

Білинський Й. Й.,  
Сухоцька І. В.,  
Гуральник А. Б.

## РОЗРОБКА ЗАСОБУ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ОБ'ЄКТІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

Запропоновано засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми та його програмне забезпечення, основними етапами якого є установка двох порогів бінаризації, що дозволяє вирівняти інтенсивність та зменшити шумові складові в контурі; знаходження координат із субпіксельною точністю та введення поправки на різкість.

**Ключові слова:** субпіксельні координати, малогабаритні об'єкти складної форми, контроль геометричних параметрів.

### 1. Вступ

Візуально-вимірювальний контроль є одним із найефективніших способів визначення геометричних параметрів досліджуваних об'єктів, і як наслідок, виявлення їх дефектів. Як правило, даний вид контролю застосовує електронно-оптичні двох координатні системи, основні переваги яких — забезпечення високої гнучкості та універсальності вимірювань. При цьому одним із основних недоліків є похибка візування в наслідок дифракції світла на краях досліджуваного об'єкта, що досягає значень до 0,02 мм. Також точність контролю залежить від кваліфікації оператора-контролера, а так як зображення на краю деталі розпливчасте й точка відзначається інтуїтивно, то суб'єктивна похибка знаходиться в межах до  $\pm 0,005$  мм. Крім цього, введення додаткових контактних засобів (щупів, оптоволоконних датчиків або наконечників) в зону вимірювань, для контролю складно-профільних кромek інструментів, зумовлює похибку контролю до  $\pm 0,0015$  мм. Найбільш оптимальними на сьогодні є засоби, що поєднують переваги електронно-оптичних двох координатних систем, а саме оптичного мікроскопа та контактного методу. За їх допомогою можна контролювати геометричні параметри малогабаритних деталей складної форми, а також вони мають можливість доступу до елементів деталей у важкодоступних місцях [1, 2].

Отже, паралельно з проектуванням і впровадженням на підприємствах нових моделей універсальних і спеціалізованих засобів необхідно розробити нові підходи та конструктивні рішення засобів контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми, що дозволить значно підвищити точність та достовірність вимірювань, а також дозволить знизити часові та фінансові витрати.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сьогодні, область вимірювання та контролю геометричних параметрів характеризується великим числом вимірювальних задач, методів і досліджуваних об'єктів [3–5]. Визначення геометричних параметрів мало-

габаритних об'єктів складної форми за допомогою методів візуалізації в сучасних вимірювальних технологіях набуває широкого розповсюдження. Відомо, що зображення одержані за допомогою оптичного мікроскопа, є геометричним відображенням досліджуваного об'єкта, розміри якого уточнюються засобами комп'ютерних технологій. Потрібно враховувати, що особливістю зображень малогабаритних деталей складної форми є досить велика розмитість та низька контрастність за рахунок неможливості повної фіксації та наведення різкості. Додатковим джерелом невизначеності є неможливість точного фокусування оптичного мікроскопа на досліджуваному об'єкті, оскільки при спробі провести контроль в області об'єкта, що знаходиться нижче фокальної площини, зображення зони візуалізації стає нечітким та розмитим (рис. 1).

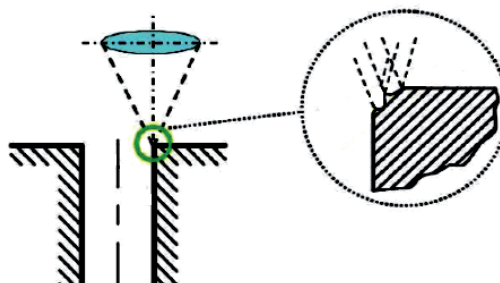


Рис. 1. Помилка в фокусуванні на поверхні об'єкта дослідження [2]

Крім цього, при обробці зображень отриманих з оптичного мікроскопа координати країв об'єктів знаходяться шляхом згладжування з наступним диференціюванням дискретного зображення. Це призводить до втрати частини вимірювальної інформації. При цьому, оскільки при контролі використовують матричні фотоприймальні пристрої, то не враховується, що координати країв об'єкта на зображенні можуть попадати як на вузли, так і між вузлами періодичної просторової ґратки. За принцип визначення країв в них використовуються інтерполяційні методи, які дозволяють знаходити додаткові точки, що призводить до зростання похибки, оскільки не завжди правильно знаходяться початкові точки відліку для виконання інтерполяції. При цьому

місцезнаходження краю обмежується похибкою величиною в половину пікселя [6].

На сьогодні, широкого застосування в масштабному серійному виробництві для контролю геометричних параметрів мають високоточні засоби компаній Hexagon Metrology TESA (Швейцарія), DEA (Італія), Jenoptik, WIKА та VEGA (Німеччина), Ernst (Швейцарія), Renishaw plc (Великобританія), Рифтэк (Білорусь), та Українсько-Американське ТОВ Фірма «КОДА» [1, 2]. Їх основним недоліком є висока вартість, яка окупується тільки при контролі деталей в масштабному серійному виробництві, проте не є рентабельними при використанні на невеликих підприємствах або лабораторіях. При цьому використання застарілих мікроскопів не дозволяє отримати необхідну точність для контролю параметрів виробів.

Отже, паралельно з проектуванням і впровадженням на підприємствах нових моделей універсальних і спеціалізованих засобів необхідно розробити нові підходи та конструктивні рішення засобів контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми, що дозволить значно знизити часові та фінансові витрати.

### 3. Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є процес контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми.

Метою роботи є підвищення точності та достовірності контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми, шляхом розробки оптико-електронного методу їх візуалізації та методу субпіксельного уточнення координат.

В роботі ставилася задача розробити узагальнену математичну модель візуалізації та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми, що знаходяться не в фокусі та засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми.

### 4. Результати досліджень контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми

Одною із головних задач знаходження геометричних параметрів об'єктів є дослідження зв'язку між розмірами зображення об'єкта та його геометричними параметрами.

Розглянемо процес формування зображення об'єкта за допомогою фотокамери, який знаходиться в фокусі оптичної системи (рис. 2).

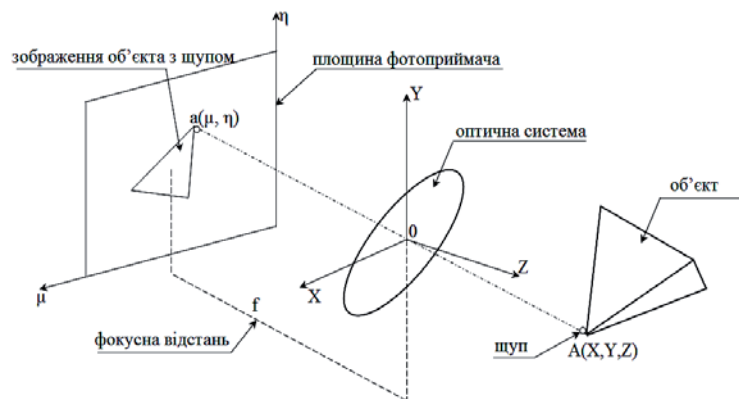


Рис. 2. Схема формування зображення об'єкта [7]

Процес формування різкого зображення об'єкта або його частини на фотоматриці є відомим [1] та будується на таких припущеннях:

1. В середовищі розповсюдження оптичних сигналів справедливі закони геометричної оптики.

2. Середовище, в якому розповсюджується оптичне випромінювання, є однорідним та має постійні значення електричної, діелектричної та магнітної провідностей.

Фотоприймальна матриця є площиною зображення, яка визначається системою координат  $(0, \mu, \eta)$ . Оптична вісь налаштована по центру лінзи та направлена вздовж осі  $Z$ . Центр оптичної системи знаходиться від фотоприймальної матриці на величині  $f$ , яка є фокусною відстанню у разі фокусування камери на досліджуваному об'єкті. Координати початку відліку оптичної системи та фотоприймальної матриці не є жорстко взаємозв'язаними в просторі, оскільки зображення може відображатися на екрані в різних масштабах [8]. Отже, координати досліджуваного об'єкта не будуть однозначно відповідати точкам зображення досліджуваного об'єкта.

Із законів геометричної оптики, по правилам збереження пропорцій, при зйомці зі сторони  $X$  (центр лінзи знаходиться на осі  $X$ ) між координатами точок в просторі та на фотоматриці справедливі наступні співвідношення [9]:

$$\begin{cases} \mu_{\Phi} = \frac{Yf}{X-f}; \\ \eta_{\Phi} = \frac{Zf}{X-f}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $f$  – фокусна відстань;  $\mu_{\Phi}, \eta_{\Phi}$  – координати на фотоматриці;  $K_e$  – коефіцієнт перетворення електронної системи, що зв'язаний з трансляцією зображення на екран монітора.

Координати на фотоматриці пов'язані з координатами на екрані формулами:

$$\eta_{\Phi} = K_e \eta; \mu_{\Phi} = K_e \mu. \quad (2)$$

Перетворення координат реального досліджуваного об'єкта в координати зображення досліджуваного об'єкта на фотоматриці можна описати за допомогою формул (1) і (2):

$$\begin{cases} X = \frac{f(F - K_e \eta)}{K_e \eta}; \\ Y = \frac{K_e \mu (F - 2K_e \eta)}{K_e \eta}. \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) справедлива для визначення координат точок об'єкта, який знаходиться в фокусі.

Як правило, при фокусуванні оптичного мікроскопа як частини електронно-оптичної двох координатної системи досліджувані об'єкти або його частини не завжди можуть знаходитися в фокусі, що слугує додатковим джерелом невизначеності при контролі геометричних параметрів. Тому, у випадку нерізкого зображення згідно з методом, що пропонується,

в зону вимірювань вводиться щуп з відомими розмірами. Це дозволяє визначити коефіцієнт масштабування, а отже і виконати перерахунок розмірів досліджуваного об'єкта за його координатами при нерізкому зображенні.

Для знаходження коефіцієнта масштабування розглянемо хід променів в оптичній системі (рис. 3).

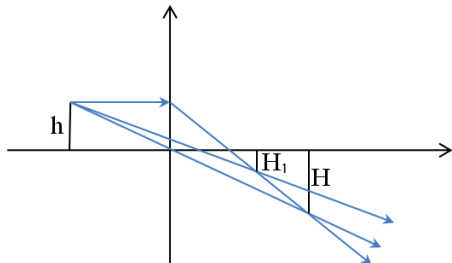


Рис. 3. Хід променів в лупі

Коефіцієнт масштабування визначається як:

$$R_M = \frac{\Gamma \cdot h}{H_1} \quad (4)$$

Таким чином для знаходження коефіцієнта масштабування потрібно знайти розміри зображення щупа  $H_1$ , при цьому його реальні розміри  $h$  відомі. Координати центра зображення щупа можна визначити за допомогою методу центра мас, при чому в ролі маси виступають значення інтенсивності пікселів. Положення центра обчислюється за формулою:

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = \frac{\sum_{i=0}^{m-x} \sum_{j=0}^{n-x} I(i, j) \begin{pmatrix} id + 1/2 \\ jd + 1/2 \end{pmatrix}}{\sum_{i=0}^{m-x} \sum_{j=0}^{n-x} I(i, j)} \quad (5)$$

Крім цього, координати точок зображення досліджуваного об'єкта необхідно визначити з субпіксельною точністю шляхом знаходження положення спільної точки зображення краю щупа та межі зображення об'єкта [1]. Ця процедура є необхідною, оскільки розміри щупа не перевищують 1 мм та при знаходженні його абсолютних розмірів виникає похибка вимірювань.

Використовуючи субпіксельне зміщення згідно [1], отримаємо систему рівнянь, яка дає змогу визначити координати крайових точок:

$$\begin{cases} X = \frac{f \left( F - K_c(n-1)d + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - (m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{\sqrt{2}} \right)}{K_c(n-1)d + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - (m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{\sqrt{2}}}; \\ Y = \frac{K_c \left( (n-1)d + 2 \left( \frac{I'(m,n) - I(m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha) \right) (F - 2K_c(n-1)d)}{K_c(n-1)d + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - (m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{\sqrt{2}}} + \\ + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - I(m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{\sqrt{2}}; \\ + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - I(m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{K_c(n-1)d + \frac{\left( \frac{I'(m,n) - I(m,n)}{(I(m,n+1) - I'(m,n+1)) + (I'(m,n) - I(m,n))} \right) (1 - \cos \alpha)}{\sqrt{2}}}. \end{cases}$$

Таким чином, запропонований метод візуалізації та контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми містить в собі такі фізичні та інформаційні процеси:

1. Підготовка дослідження контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми:
  - реєстрація та формування зображення робочої поверхні без досліджуваного об'єкта;
  - контакт щупа та поверхні досліджуваного об'єкта та визначення впливу взаємодії при їх дотику;
  - реєстрація та формування зображення досліджуваного об'єкта з дотиком щупа до нього.
2. Обробка зображень досліджуваного об'єкта:
  - віднімання двох зображень для видалення фоновому шуму та встановлення першого порогу фільтрації.
 Для видалення шумових складових та фону зображення необхідно встановити початковий поріг по інтенсивності. Для цього здійснюється формування зображення робочої поверхні без досліджуваного об'єкта та об'єкта з щупом. Установки порогу відбувається шляхом віднімання двох зображень та визначається з системи рівнянь:

$$t = \begin{cases} a_{ij} - b_{ij}, & \text{при умові } a_{ij} \geq b_{ij}, \\ 0, & \text{при умові } a_{ij} < b_{ij}; \end{cases} \quad (6)$$

- визначення поелементного перетворення за допомогою методу Оцу для видалення шумових складових з контуру об'єкта.

Для вирівнювання інтенсивності контуру використовується повторний поріг бінаризації за методом Оцу [10]:

$$T = \sigma_b^2(t)_{MAX} = w_1(t)w_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]; \quad (7)$$

- виконання поелементного перетворення на основі отриманих значень та виділення стоншеного контуру;

- виділення ділянки дотику щупа до об'єкта на зображенні;

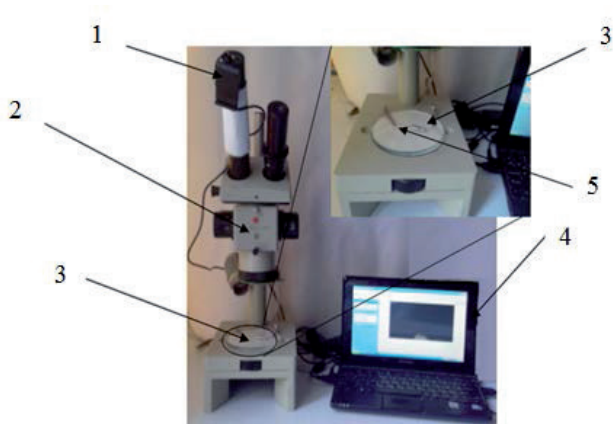
- знаходження точку дотику в виділеній області шляхом отримання точок перетину приміжових кривих спільних для досліджуваного об'єкта та щупа.

3. Процес визначення геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми:

- знаходження координат крайової точки досліджуваного об'єкта з субпіксельною точністю;
- визначення діаметру щупа на зображенні з урахуванням субпіксельних координат;
- визначення масштабуючого коефіцієнту шляхом порівняння знайденого діаметру щупа із його паспортним значенням та поправка на різкість зображення;
- перерахунок координат досліджуваного об'єкта з урахуванням коефіцієнта масштабування;
- визначення геометричних параметрів з субпіксельною точністю.

## 5. Обговорення результатів дослідження контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми

На основі запропонованого методу розроблено засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми (рис. 4).



**Рис. 4.** Засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми: 1 — відеокамера; 2 — оптичний мікроскоп МБС-10; 3 — досліджуваний об'єкт; 4 — ноутбук; 5 — щуп

Особливістю запропонованого засобу є введення в зону вимірювання щупа для визначення коефіцієнту масштабування та використання програмного забезпечення для знаходження координат точок зображення досліджуваного об'єкта із субпіксельною точністю.

При контролі геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми сферичний наконечник

щупа підводиться до досліджуваного об'єкта та завдяки фотоматриці фіксується зображення, яке подається на комп'ютер.

Зображення отримані за допомогою запропонованого засобу проілюстровані на рис. 5.

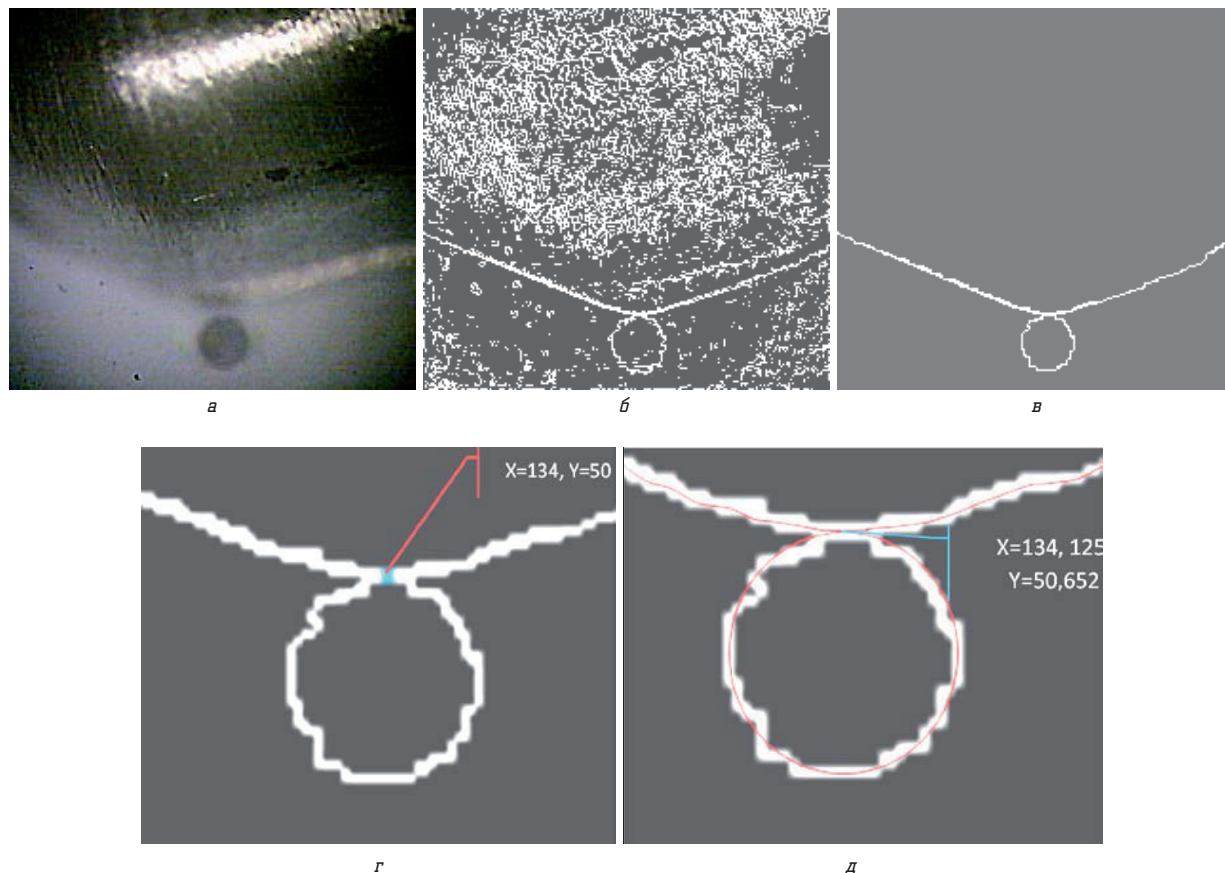
Отримані зображення обробляються програмним забезпеченням, яке працює на основі запропонованого методу.

Кінцевим результатом обробки є числові значення субпіксельних координат крайових точок зображення малогабаритного об'єкта складної форми з похибкою, що не перевищує 10 % ширини пікселя.

### 6. Висновки

Запропоновано метод візуалізації малогабаритних об'єктів складної форми з субпіксельним визначенням координат зображення об'єкта з похибкою, що не перевищує 10 % ширини пікселя, основною перевагою якого є перерахунок координат згідно з поправкою на різкість.

Розроблено засіб контролю геометричних параметрів малогабаритних об'єктів складної форми, особливостями якого є введення в зону вимірювання щупа для визначення поправки на різкість та використання програмного забезпечення для знаходження координат точок зображення досліджуваного об'єкта із субпіксельною точністю.



**Рис. 5.** Приклад контролю геометричних параметрів запропонованим засобом: *а* — зображення отримане за допомогою оптичного мікроскопа; *б* — отримане зображення після першого порогу фільтрації; *в* — зображення після другого порогу фільтрації (фільтрація за методом Оцу); *г* — значення координат *X* та *Y* точки дотику щупа та досліджуваного об'єкта; *д* — значення координат *X* та *Y* точки дотику щупа та досліджуваного об'єкта з субпіксельною точністю



**Література**

1. Білінський, Й. Й. Метод знаходження субпикселних координат контурних точок зображення об'єкта, отриманих тактильно-оптичним сенсором [Текст] / Й. Й. Білінський, І. В. Сухоцька, С. В. Юкиш // Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. — 2014. — Вип. 3. — С. 94–99.
2. Зуйков, А. А. Повышение точности координатных измерений геометрических параметров объектов в компьютерной микроскопии с дополнительным телом в зоне измерения [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.16 / А. А. Зуйков. — М.: Московский государственный технологический университет «СТАНКИИ», 2013. — 22 с.
3. Кондратов, В. Т. Визуализация в метрологии: урони, напрямлення, цели, задачи, методы и программное обеспечение [Текст] / В. Т. Кондратов // Вимірjuвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2001. — № 1. — С. 7–22
4. Ермолов, И. Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества [Текст]: учеб. пос. для инж.-техн. спец. вузов / И. Н. Ермолов, Ю. Я. Останин. — М.: Высшая школа, 2002. — 368 с.
5. Глухов, В. И. Метрологическое обеспечение качества по точности геометрических величин [Текст]: учеб. пособие / В. И. Глухов. — Омск: ОмГТУ, 2012. — 140 с.
6. Білінський, Й. Й. Методи обробки зображення в комп'ютеризованих оптико-електронних системах [Текст]: монографія / Й. Й. Білінський. — Вінниця: ВНТУ, 2010. — 272 с.
7. Нестеров, В. Н. Метод многомерных тестовых объектов в оптических измерительных системах [Текст] / В. Н. Нестеров, В. М. Мухин, А. В. Мещанов. — Самара: СНЦРАН, 2013. — 224 с.
8. Малышева-Стройкова, А. Н. Оптоэлектронные устройства дистанционного контроля геометрических параметров профильных объектов [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.05 / А. Н. Малышева-Стройкова. — М., 2014. — 188 с.
9. Фу, К. Робототехника [Текст] / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. — М.: Мир, 1989. — 624 с.
10. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [Text] // IEEE Transactions on Systems, Man, and

Cybernetics. — 1979. — Vol. 9, № 1. — P. 62–66. doi:10.1109/tsmc.1979.4310076

**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

Предложено средство контроля геометрических параметров малогабаритных объектов сложной формы и его программное обеспечение, основными этапами которого является установка двух порогов бинаризации, что позволяет выровнять интенсивность и уменьшить шумовые составляющие в контуре; нахождение координат с субпиксельной точностью и введение поправки на резкость.

**Ключевые слова:** субпиксельные координаты, малогабаритные объекты сложной формы, контроль геометрических параметров.

*Білінський Йосип Йосифович, доктор технічних наук, професор, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.*

*Сухоцька Ірина Володимирівна, аспірант, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна, e-mail: mukylka@gmail.com.*

*Гуральник Артем Борисович, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.*

*Білінський Йосиф Йосифович, доктор технічних наук, професор, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.*

*Сухоцька Ірина Владимировна, аспірант, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.*

*Гуральник Артем Борисович, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.*

*Bilynsky Josyph, Vinnytsia National Technical University, Ukraine. Suchocka Irina, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: mukylka@gmail.com.*

*Huralnyk Artem, Vinnytsia National Technical University, Ukraine*